МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.523

В.П. ЖАРОВ, А.Т. РЫБАК, С.А. ЗАТОЛОКИН, В.И. МИРНЫЙ

ПРИВЕДЕННАЯ ОБЪЁМНАЯ ЖЁСТКОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на определение приведенной объёмной жёсткости рукавов высокого давления и зависимости приведенной объёмной жёсткости гидравлического цилиндра от изменения объёмов рабочих полостей в процессе перемещения его штока.

Ключевые слова: *гидросистема, объёмная жёсткость, эксперимент.*

Постановка задачи. Стремительное развитие электронных средств решения математических задач привело к повышению популярности численных методов решения дифференциальных уравнений, описывающих функционирование гидромеханических систем (ГМС) на неустановившихся режимах. Один из таких методов использует понятие «приведенная объёмная жёсткость» (ПОЖ) [1], которая представляет собой приращение давления, необходимое для изменения объема рассматриваемого участка гидросистемы на единицу.

Для определения ПОЖ различных гидроаппаратов, в том числе гидролиний, получен ряд формализованных зависимостей [1]. Однако в указанной работе отсутствует экспериментальное подтверждение полученных аналитически формул. С другой стороны, формулы для определения ПОЖ гидролиний можно применять только для изотропных оболочек, выполненных из материалов, модуль упругости которых несоизмеримо выше модуля упругости рабочей жидкости. В то время как в силовом гидравлическом приводе широко используются рукава высокого давления (РВД), упругие свойства которых до сих пор не поддаются строгому аналитическому описанию. В этом случае приведенную объёмную жёсткость следует определять экспериментально.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе поставлены две задачи:

- разработать методику и произвести экспериментальные исследования, которые бы подтвердили или опровергли полученные аналитически формулы для определения ПОЖ поршневого гидроцилиндра (ГЦ);
- разработать методику и произвести экспериментальные исследования, направленные на определение ПОЖ РВД.

ПОЖ поршневого гидравлического цилиндра. Следует отметить, что в результате изменения внутренних объёмов рабочих полостей ГЦ в процессе функционирования изменяются и их приведенные объёмные жёсткости. Это изменение описывается следующими формулами [1]:

$$C_{\text{пр.п}} = \frac{4E_{\text{ж}}}{\pi d^2 x\left(1+\dfrac{d}{\delta}\dfrac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}}\right)+4V_{\text{п.вр}}};$$

$$C_{\text{пр.шт}} = \frac{4E_{\text{ж}}}{\pi(L\text{-}x)\cdot\left[\left(d^2-d^2_{\text{шт}}\right)+\dfrac{d^3}{\delta}\dfrac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}}\right]+4V_{\text{шт.вр}}},$$

где $C_{\text{пр.п}}$ и $C_{\text{пр.шт}}$ – ПОЖ поршневой и штоковой полостей ГЦ соответственно; L – полный ход штока; $d_{\text{шт}}$ – диаметр штока; d – внутренний диаметр гильзы ГЦ в ненапряжённом состоянии; x – перемещение штока; $E_{\text{ж}}$ и $E_{\text{ст}}$ – модули упругости жидкости и материала стенки ГЦ соответственно; δ – толщина стенки ГЦ; $V_{\text{п.вр}}$ и $V_{\text{шт.вр}}$ – объём вредного пространства поршневой и штоковой полостей ГЦ соответственно.

С целью подтверждения приведенных выше аналитических зависимостей были произведены экспериментальные исследования гидроцилиндра с диаметром поршня $d_{\text{п}}$ = 80 мм, диаметром штока $d_{\text{шт}}$ = 40 мм, длиной хода штока L = 0,9 м, толщиной стенки гильзы 10 мм. В качестве рабочей жидкости использовалось минеральное масло МГП-30.

Методика исследования гидроцилиндра. Определение ПОЖ ГЦ осуществлялось на специальном стенде, схема которого приведена на рис.1.

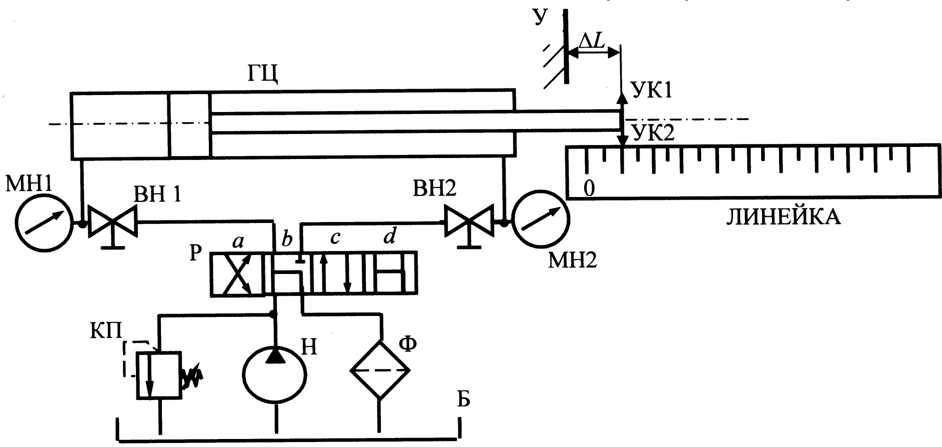


Рис.1. Принципиальная схема стенда для определения ПОЖ рабочих полостей поршневого ГЦ

Для измерения контролируемых величин использовались следующие приборы: для определения величины хода штока гидроцилиндра – металлическая линейка с пределом измерения 1000 мм и ценой деления 1 мм; для контроля давления – образцовые манометры с пределом измерения 25 МПа, ценой деления шкалы 0,1 МПа и с классом точности 0,4; для определения перемещения штока в результате деформации корпуса гидроцилиндра и сжимаемости рабочей жидкости под воздействием изменения давления – электронный штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм.

Перед началом серии опытов стенд был тщательно подготовлен. Испытуемый гидроцилиндр и все прочие элементы гидросистемы были заполнены рабочей жидкостью таким образом, чтобы гарантировать отсутствие во внутренней полости свободных объемов воздуха и других газовых включений. Обеспечена абсолютная герметичность системы. На протяжении всего эксперимента гидронасос Н оставался включенным.

Эксперименты осуществлялись следующим образом. Шток ГЦ полностью втягивается внутрь гильзы. Указатели УК1 и УК2, закреплённые на штоке ГЦ, совмещаются с 0 линейки и с передвижным упором У, расположенным на неподвижной раме стенда соответственно. Стенд готов к работе.

При закрытом вентиле ВН2 и открытом вентиле ВН1 гидрораспределитель Р устанавливается в позицию « *c* », рабочая жидкость от гидронасоса Н направляется в поршневую полость гидроцилиндра ГЦ. В результате сжатия рабочей жидкости, находящейся в штоковой полости ГЦ, и деформации её стенки шток выдвигается, при этом повышается давление как в поршневой, так и в штоковой полостях. Уровень давления контролируется соответственно манометрами МН1 и МН2. После срабатывания предохранительного клапана КП герметично закрывается вентиль ВН1, а золотник гидрораспределителя Р переводится в позицию « *d* », обеспечивающую разгрузку гидронасоса Н.

По линейке контролируется полный ход штока. С помощью штангенциркуля контролируется перемещение штока ΔL_{i1}, произошедшее в результате суммарной деформации рабочей жидкости в штоковой полости ГЦ и её стенки – расстояние от упора У до указателя УК1.

Затем открывается вентиль ВН2. Рабочая жидкость вытекает из штоковой полости ГЦ в гидробак Б, и шток выдвигается на величину ΔL_{i2} за счёт расширения рабочей жидкости в поршневой полости и сжатия её, ранее деформированной, стенки. Здесь следует иметь в виду, что расстояние между упором У и указателем УК1 представляет собой суммарное перемещение штока

$$\sum \Delta L_i = \Delta L_{i1} + \Delta L_{i2},$$

где i – номер перестановки упора У (в описываемом случае i= 1), i = 1…*n*. Причём *n* зависит от предела измерения штангенциркуля и суммарного хода штока ГЦ. Описанные выше измерения производятся до тех пор, пока штангенциркуль обеспечивает измерение $\sum \Delta L_i$.

Затем упор У перестанавливается (i = 2). По линейке фиксируется ход штока, при котором производится перестановка упора У. Эксперимент продолжается до полного выдвижения штока гидроцилиндра из гильзы.

Обработка опытных данных осуществлялась следующим образом (рис.2). При каждом положении штока ГЦ, начиная с 0, производятся следующие расчёты:

- определяется изменение объёмов штоковой $\Delta V_{\text{шт}i}$ и поршневой $\Delta V_{\text{п}i}$ полостей гидроцилиндра:

$$\Delta V_{\text{шт}i} = \frac{\pi\left(d_{\text{п}}^2 - d_{\text{шт}}^2\right)}{4}\,\Delta L_{i1}, \quad \Delta V_{\text{п}i} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4}\,\Delta L_{i2};$$

- для данного положения штока гидроцилиндра определяются приведенные объёмные жёсткости его полостей:

$$C_{\text{пр.шт}} = \frac{p_{\text{шт}}}{\Delta V_{\text{шт}i}}, \quad C_{\text{пр.п}} = \frac{p_{\text{п}}}{\Delta V_{\text{п}i}};$$

- рассчитывается приведенный модуль упругости для каждой из полостей гидроцилиндра:

$$E_{\text{пр.п}} = C_{\text{пр.п}} \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} L, \quad E_{\text{пр.п}} = C_{\text{пр.шт}} \frac{\pi\left(d_{\text{п}}^2 - d_{\text{шт}}^2\right)}{4} L.$$

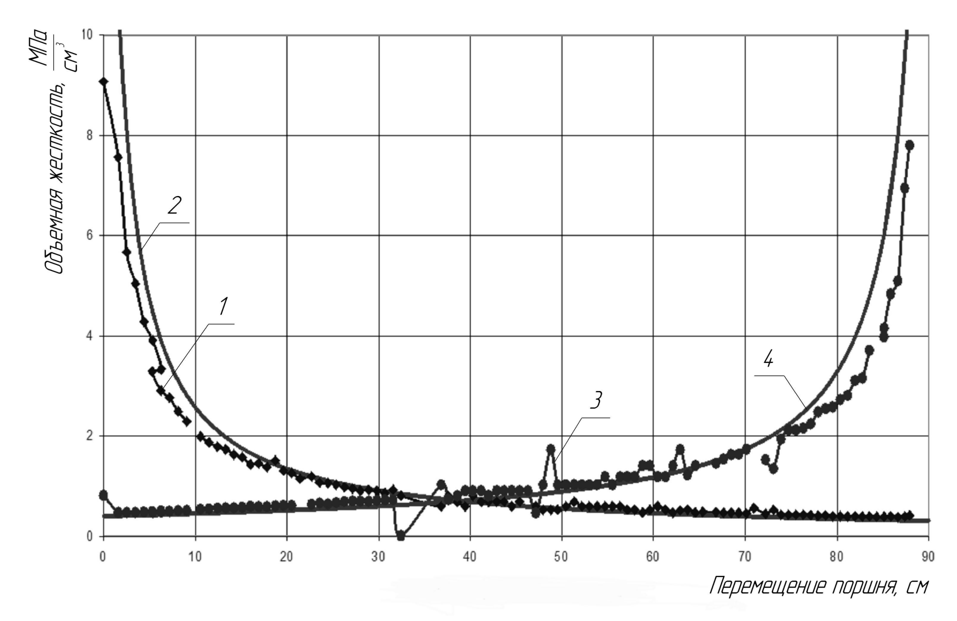


Рис.2. Графики изменения ПОЖ полостей поршневого ГЦ при перемещении его штока: 1 – поршневая полость экспериментальная; 2 – поршневая полость теоретическая; 3 – штоковая полость экспериментальная; 4 – штоковая полость теоретическая

Расчёты производились по всему ходу штока гидроцилиндра, который составляет L = (0…90) см.

Результаты экспериментальных исследований гидроцилиндра, приведённые в виде графиков 1 и 3 на рис. 2, свидетельствуют о том, что характер зависимостей ПОЖ рабочих полостей поршневого гидроцилиндра от перемещения его штока, полученных экспериментально и рассчитанных по приведенным выше формулам, идентичен. Погрешность между расчётными и экспериментальными значениями ПОЖ не более 10-15%, что с указанной погрешностью позволяет использовать предлагаемые формулы для описания динамических процессов, протекающих в рабочих полостях гидроцилиндров.

Приведенная объёмная жёсткость РВД. Экспериментальное определение ПОЖ РВД осуществлялось по специально разработанной методике с использованием стенда, выполненного на базе грузопоршневого манометра МП-600 (рис.3).

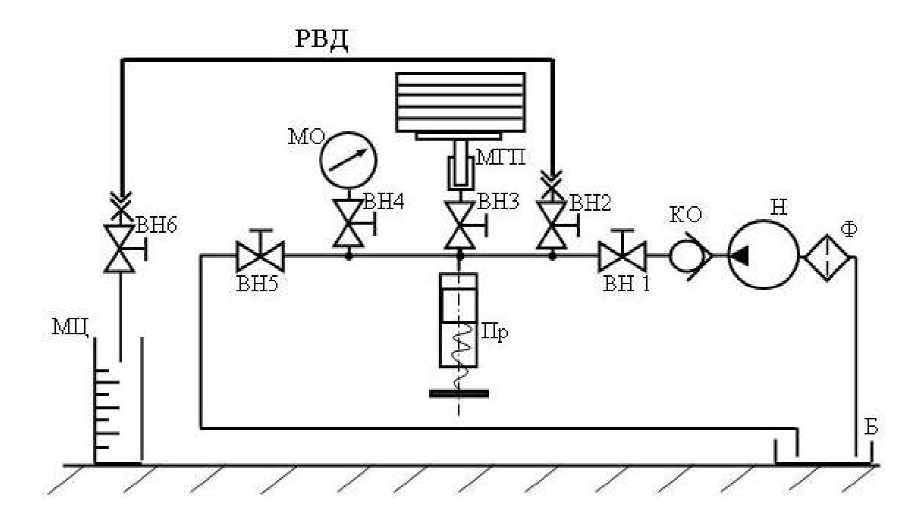


Рис.3. Гидравлическая схема стенда для определения ПОЖ РВД

Работа на стенде осуществлялась в следующем порядке. Ручным гидронасосом Н рабочая жидкость забирается из гидробака Б и через обратный клапан КО и открытый вентиль ВН1 нагнетается во внутреннюю полость стенда. Вентили ВН5 и ВН6 при этом герметично закрыты, а вентили ВН2, ВН3 и ВН4 открыты. По достижении давления внутри гидросистемы стенда, контролируемого образцовым (МО) и грузопоршневым (МГП) манометрами требуемого уровня, закрывается вентиль ВН1. После этого при помощи винтового пресса Пр давление плавно доводится до требуемой величины. Вентиль ВН2 закрывается, что изолирует внутренний объём испытуемого РВД от объёма гидросистемы стенда. Открывается вентиль ВН6, и в результате сжатия деформированного РВД из него в соответствующий мерный цилиндр вытесняется объём жидкости, за счёт нагнетания которого давление внутри рукава было увеличено.

С целью повышения точности измерений на каждом давлении осуществлялось несколько замеров (от 3 до 15).

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием следующих зависимостей:

$$V = \frac{V_{\Sigma}}{N}\ ; \qquad C_{\text{пр}} = \frac{p}{V},$$

где V – средний объём жидкости, вытесненной из РВД за один цикл его нагружения при каждом уровне давления; V_{Σ} - суммарный объём жидкости, вытесненной из РВД за весь опыт при данном уровне давления; N – число циклов нагружения при данном уровне давления; $C_{\text{пр}}$ – ПОЖ РВД при давлении p.

Результаты исследований РВД приведены в виде графиков на рис.4-6, на которых изображены полученные экспериментально зависимости ПОЖ РВД от давления.

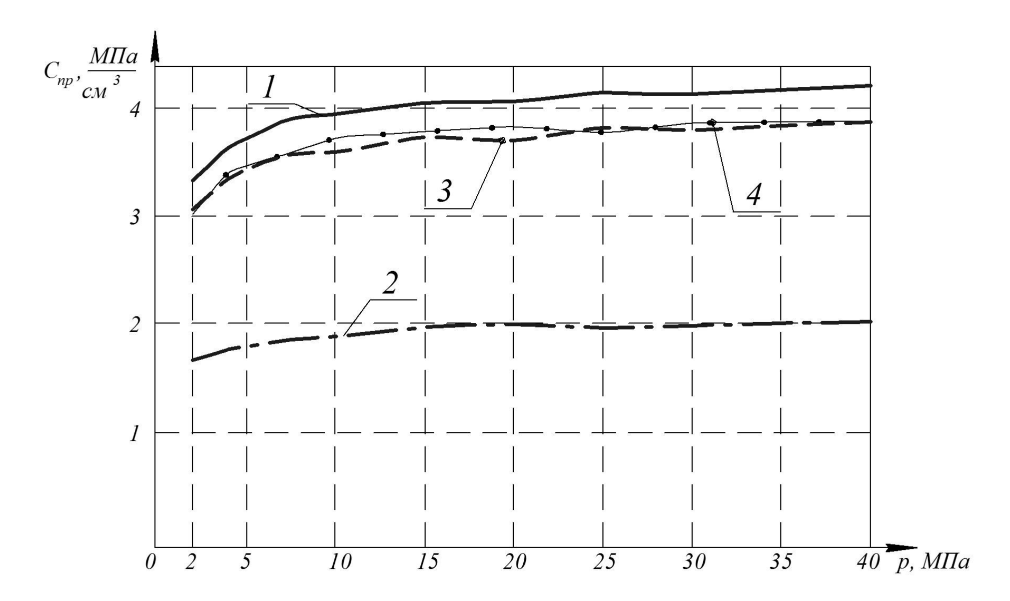


Рис.4. Графики зависимости от давления ПОЖ РВД с диаметром условного прохода d_1 = 16 мм, длина которого, без учёта длины ниппелей штуцеров (чистая длина, резинокордовой оболочки), составляет L_{11} = 0,94 м (1); такого же рукава длиной L_{12} = 1,94 м (2); тех же рукавов, пересчитанные на 1 погонный метр их длины (3) и (4) соответственно

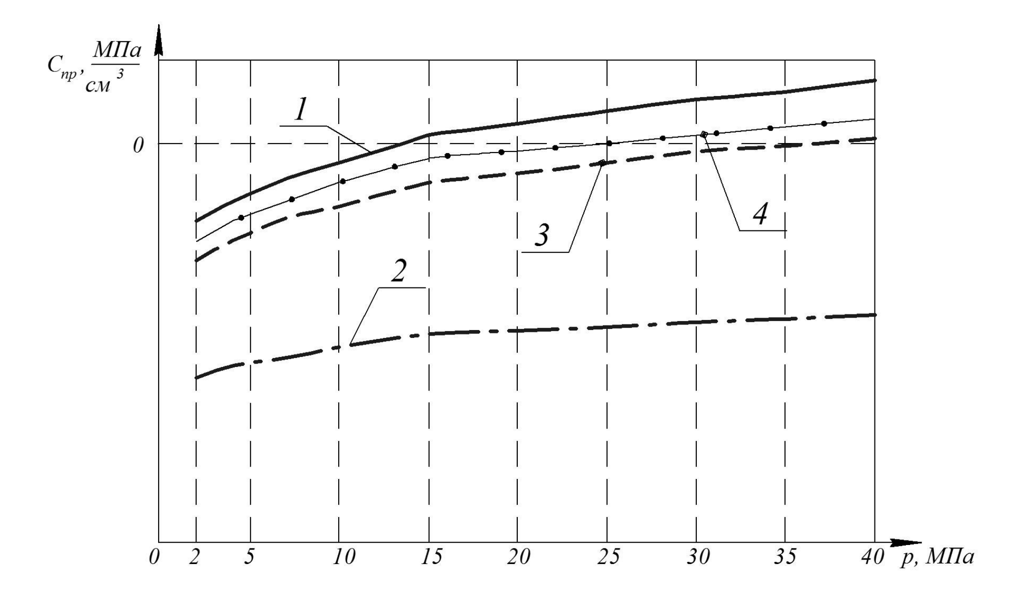


Рис.5. Графики зависимости от давления ПОЖ РВД с диаметром условного прохода d_2 = 32 мм, длиной L_{21} = 0,88 м (1); такого же рукава длиной L_{22} = 1,88 м (2); тех же рукавов, пересчитанные на 1 погонный метр их длины (3) и (4) соответственно

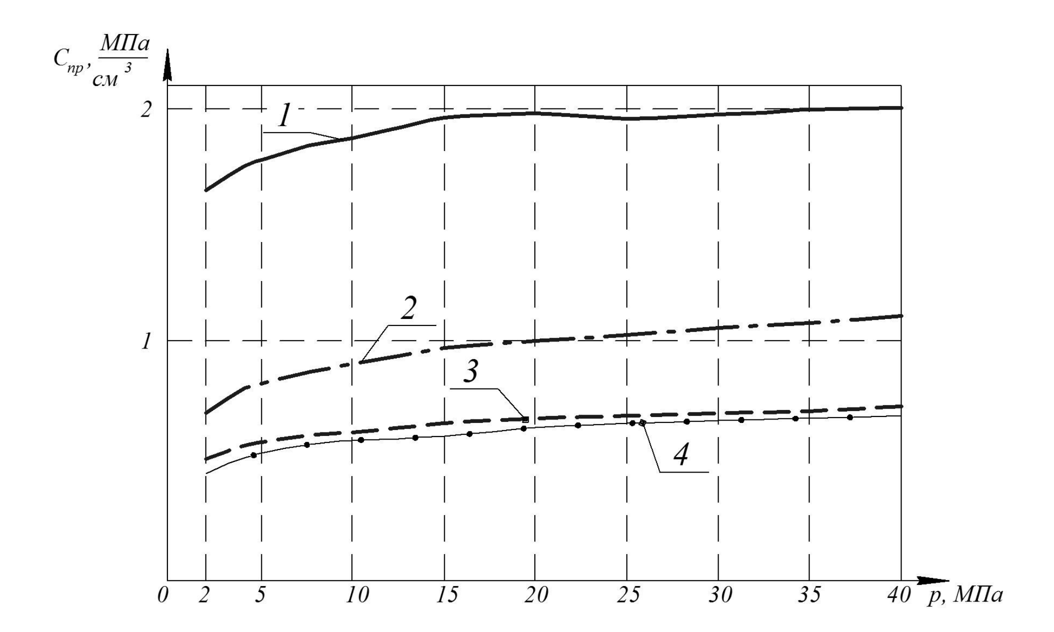


Рис.6. Графики зависимости ПОЖ РВД: диаметром условного прохода d_1=16 мм, длиной L_{12}=1,94 м (1); диаметром условного прохода d_2 = 32 мм, длиной L_{21} = 0,88 м (2); тех же рукавов, включённых в цепь параллельно, полученная экспериментально (3) и рассчитанная аналитически с использованием экспериментальных данных (см.рис. 3, кривые 1 и 2) (4)

Анализируя полученные кривые, легко заметить, что приведенная объёмная жёсткость всех исследуемых РВД при низком уровне нагружения (p < 15 МПа) нелинейно возрастает с ростом давления. Такой характер изменения ПОЖ резинокордовых РВД можно объяснить тем, что в указанной зоне изменения давления изменение их внутреннего объёма происходит в результате выборки зазоров между струнами плетёного металлического корда. При дальнейшем повышении давления внутри оболочки её ПОЖ изменяется линейно, так как в этом случае происходит растяжение струн, образующих корд. То есть здесь оболочку с некоторым приближением можно рассматривать как металлическую поверхность с определёнными жёсткостными характеристиками.

Выводы. По результатам описанных выше экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

во-первых, как уже говорилось, предлагаемые в [1] формулы по определению ПОЖ с достаточной точностью согласуются с экспериментальными данными, а потому могут быть использованы при описании динамики процессов, протекающих в гидравлических приводах;

во-вторых, при описании динамических процессов, протекающих в РВД, могут использоваться экспериментальные зависимости их ПОЖ от давления. Очевидно также, что для определения ПОЖ РВД различной длины нет необходимости экспериментально исследовать каждый из них, достаточно знать ПОЖ единицы длины оболочек различного типа, что позволит рассчитать приведенную объёмную жёсткость рукавов высокого давления для любой длины, изготавливаемых из этих оболочек.

Библиографический список

1. Рыбак А.Т. Объёмная жёсткость и её влияние на динамику гидромеханической системы / А.Т. Рыбак // Вестник ДГТУ. – 2006. –Т.6. – №3(30). – С. 200-207.

Материал поступил в редакцию 27.10.08.

V.P. JAROV, A.T. RYBAK, S.A. ZATOLOKIN, V.I. MIRNY

BROUGHT THREE-DEMENTIONAL ACERBITY OF THE HYDRAULIC SYSTEMS

Happen to the results of the experimental studies, directed on determination brought three-dementional acerbity sleeve high pressure and hydraulic cylinder from degree of the moving the rod.

РЫБАК Александр Тимофеевич (р. 1953), профессор кафедры «Технологическое оборудование» Донского государственного технического университета (2008), кандидат технических наук (1990). Окончил РИСХМ (1979) по специальности «Приборы точной механики».
Научные интересы связаны с исследованием динамики гидромеханических систем и их элементов.
Имеет более 90 публикаций, в том числе 18 авторских свидетельств СССР и патенты РФ.

ЖАРОВ Виктор Павлович (р. 1937), заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (1980).
Научные интересы связаны с исследованием гидравлических систем автоматического регулирования и управления мобильных машин и технологического оборудования.
Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, учебники с грифом Минобразования РФ, отраслевой и государственный стандарты, 9 авторских свидетельств СССР и патентов РФ.

ЗАТОЛОКИН Сергей Александрович (р. 1983), аспирант кафедры «Технологическое оборудование» ДГТУ (2006).
Научные интересы связаны с исследованием гидравлических систем технологического оборудования.
Имеет 9 научных публикаций.

МИРНЫЙ Виктор Игнатьевич (р. 1947), ст.преподаватель кафедры «Управление качеством» Донского государственного технического университета.
Научные интересы связаны с исследованием динамики гидромеханических систем и их элементов.

Имеет 9 научных публикаций.